第4章

# マイクロストリップ線路を利用したフィルタの設計事例

～配線パターンの線幅や長さが，なぜ*L*や*C*に変わるのか～

西村芳一

**筆者は1.2GHzまでの通過帯域を持つローパス・フィルタを，インダクタやキャパシタを用いて設計した．その後，インダクタやキャパシタを配線パターンに置き換え同等の性能を得た．その際，いかにして配線パターンがインダクタやキャパシタになるかを検討したので，ここに紹介する．（編集部）**

身近なパソコンのCPUのクロックが3GHzといっても，普通に感じるこの時代に，そのような高周波信号を扱うのは簡単なんだと，つい錯覚に陥ってしまいそうです．しかし，実際には1GHzを超えるような信号を従来の回路設計の感覚で扱うのは不可能です．信号の波長が，部品やパターンの物理的寸法を無視できないくらいの長さになっているからです．

## 1 配線パターンがフィルタになる

空間における電気信号は，ほぼ光速で伝送し，毎秒$3 \times 10^8$m進みます．例えば3GHzの1波長はわずかに10cmです．実際に配線パターン上で電子回路を構成する場合，基板は空間より大きな誘電率を持ちますから，信号の伝播速度はそれより遅くなり，1波長はもっと短くなります．

### ● 集中定数は素子の特性を理想化していただけ

そのため，このようなマイクロ波の信号を処理する場合には，**写真1**のようなインダクタ(*L*)，キャパシタ(*C*)，抵抗(*R*)の集中定数を使った回路設計がとても難しくなります．もはや部品は，理想的な素子の特性から離れ，素子をつなぐ配線パターンまでもが特性に影響するからです．

確かにカット＆トライで，ある程度は対処できますが，目隠しをした状態で設計しているようなものです．従って分布定数回路の考え方と，部品の等価回路を基本に，回路設計を考える必要がでてきます．

### ● 1.2GHzのローパス・フィルタを設計してみる

例として，1.2GHzのチェビシェフ・ローパス・フィルタを紹介します．まずは**図1**のように，*LC*フィルタ設計ソフトウェア[注1]を使い，理想的なフィルタを設計します．次に，村田製作所の1608サイズで温度特性がCH特性を持つセラミック・コンデンサと，TDKの1608サイズ積層コイル・インダクタを使い，0.8mm厚のFR-4ガラス基板でパターンを設計してみます(**図2**)．なお，設計には米国Applied Wave Research(AWR)社のMicrowave Officeを使いました．それぞれの等価実測パラメータは，部品メーカのWebサイトからデータをダウンロードしたものです．

注1：ソフトウェアは筆者が作ったもので，参考文献(4)に付属している．

**写真1　*LCR*で構成したフィルタ**

KeyWord　インダクタ，キャパシタ，集中定数，分布定数，比誘電率，マイクロストリップ線路，同軸ケーブル，特性インピーダンス，パターン幅

● **チップ部品では設計通りの特性が得られなかった**

**図2**の回路の$S$パラメータを調べると，理想特性とはかけ離れた特性を示していることが分かります(**図3**)．だいぶカットオフ周波数が低くなっています．パターンの物理的な大きさや，理想素子からのずれが影響し，特性を変化させています．インダクタはもはや，インダクタと単純にいえないほど，やっかいな特性を示します．こうなると特性の合わせ込みはカット＆トライしかなくなってきます．

● **配線パターンでフィルタを設計する**

分布定数回路といわれれば，確かに学校では勉強しましたが，マイクロ波の世界になじみのない人には，とても難しそうに思えます．それに，複雑なシミュレーションを必要とし，そのようなソフトウェアがなければ，設計は無理かなと思わせるものです．一般的には，マイクロ波の設計ソフトウェアはとても高価であり，ちょっと試して気軽に購入するわけにもいきません．

そのような中筆者は，森 栄二氏が書かれた「マイクロウエーブ入門講座」[3]を読んで，大いに感銘を受けました．何か自分でも手に届くところにある技術のように思えたからです．それに，ただの配線パターンに過ぎないマイクロストリップ線路が，いろいろな振る舞いをするのをとても面白いと思いました．手作りのプリント基板でも，いろいろなことができそうで，筆者の製作意欲をそそりました．

マイクロストリップ線路の基本が分かってくると，今度はそれを使って具体的に回路を設計したくなってきます．特に興味を持ったのは，回路の基本構成であるフィルタ回路です．本誌をはじめさまざまな本に，**図4**のような奇妙な形のパターンが，フィルタになるという記事を見かけます．とても面白いのですが，そのようなマイクロストリップ線路を使ったフィルタを，実際にいかに設計するのかの記事は，森氏の書籍を含め，あまり見かけたことがありません．

そのような時，1冊の書籍「Microstrip Filter for RF/Micorwave Applications」[1]に出会いました(**写真2**)．まさしく，筆者が求めていた内容が具体的に，実用的に書いてあります．筆者の想像を越えるような，へんてこなマイクロストリップ線路の形のフィルタも紹介され，しかも，とても優れた特性を示しています．この分野の奥の深さを知ったと同時に，とても興味を持ち，勉強の意欲がわいてきました．

**図1　筆者の制作した*LC*フィルタ設計ソフトウェアの起動画面**

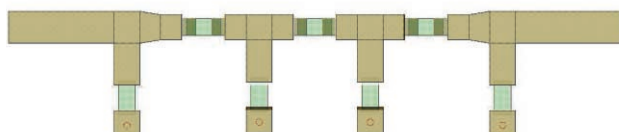



**図2　チップの*L*と*C*を使い設計した1.2GHzのチェビシェフ・ローパス・フィルタのパターン**
0.8mm厚のFR-4ガラス基板を前提にパターンを設計した．

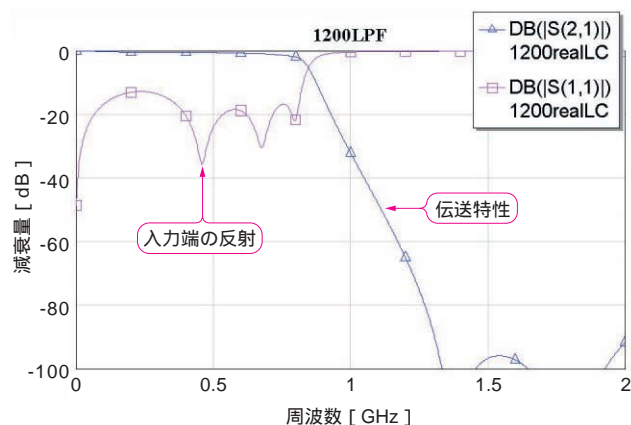



**図3　図2の*S*パラメータを調べたら理想特性とはかけ離れていた**
カットオフ周波数が低くなっている．合わせ込みはカット＆トライしかない．

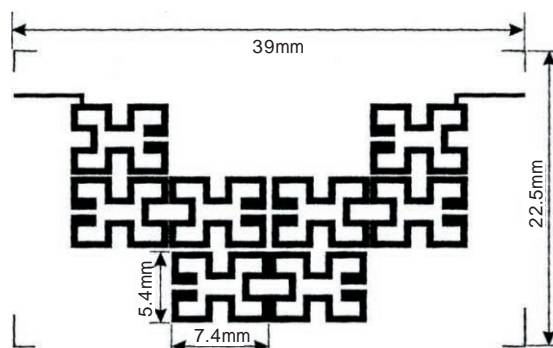



**図4[1]　マイクロストリップ・ラインで設計したフィルタ**
マイクロストリップ・ラインの世界には，奇妙な形の配線パターンが多数ある．

書籍の中では確かに，基本的な設計式は示されていますが，マイクロ波のシミュレータがないと，具体的な設計ができないものもたくさん紹介されています．しかし，それだけではありません．**図5**のような比較的簡単な構成のフィルタは，電卓があれば設計できる具体的なアプローチを示しています．そのとき仕事で設計していた無線機で，今まで*LC*の集中定数で設計していたフィルタを，筆者の趣味で無理やりこの分布定数フィルタに置き換える暴挙に走ってしまいました．

**● 書籍に書いてある通りに設計したら一発で成功**

今まで何も試したことがありませんでした．本を信じて一発勝負です．そうして具体的に電卓を使って設計し，でき上がったものが**写真3**のフィルタです．わくわく，どきどきしながらネットワーク・アナライザで特性を測定すると，まさしく設計した通りの特性が出ています[注2]．これはいい！ということになったわけで，すっかりはまってしまいました．興味をもった方は，ぜひこの本を読んでみることをお勧めします．ここで紹介できない，面白い設計例がいっぱいあります．

## 2 伝送路の特性インピーダンス

筆者はこれまで，オーディオ回路やビデオ回路など，いろいろな種類の回路設計を行ってきました．それぞれを設計する際には，別々の流儀があり，ある回路設計の基本の延長線上でほかのジャンルの設計をするのは難しいと思います．例えばオーディオ回路では普通に使われるOPアンプのアクティブ・フィルタですが，ビデオ回路では*LC*のパッシブ・フィルタを使うことが多いと思います．しかし，共通しているのは，極論をいえば，まだ配線パターンは部品を配線するための手段としか，考えていないことではないでしょうか．

**● 送りと受けの特性インピーダンスをそろえる**

一方，マイクロ波の回路設計では，回路設計の中に配線パターンの設計も含まれ，目的の特性を実現するためには，その存在を無視できません．例えばインピーダンス・マッチングを考え，いかに効率良くパワーを後段に伝達していくかを考える上で，配線パターンの設計がとても重要になってきます．低い周波数の回路では，電圧ゲインを気にすればよい場合が多いのですが，高周波ではその考え方は基本的に変える必要があります．

そこでキーになるのが回路の特性インピーダンスです．例えば，**図6**のように分布定数の伝送路には特性インピーダンスがあり，そのインピーダンスの信号源で信号を送り出し，特性インピーダンスで終端すると，信号源からのエネルギーが終端まで100％伝送できます（理想的ロスレス線路の場合）．しかし，例えば終端抵抗が特性インピーダ

注2：ローパス・フィルタの具体的な設計例を近号で紹介する．

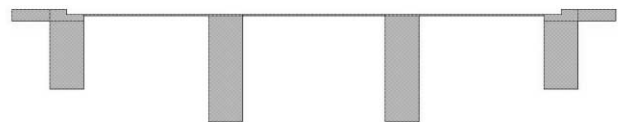



**図5　簡単な構成のフィルタ**
参考文献(1)には電卓で設計するための方法が紹介されている．

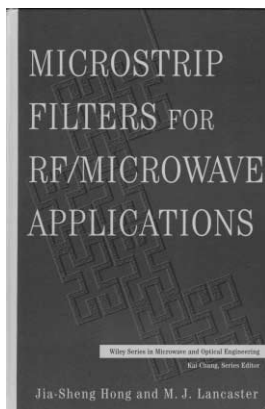



**写真2　筆者が購入した書籍の表紙**

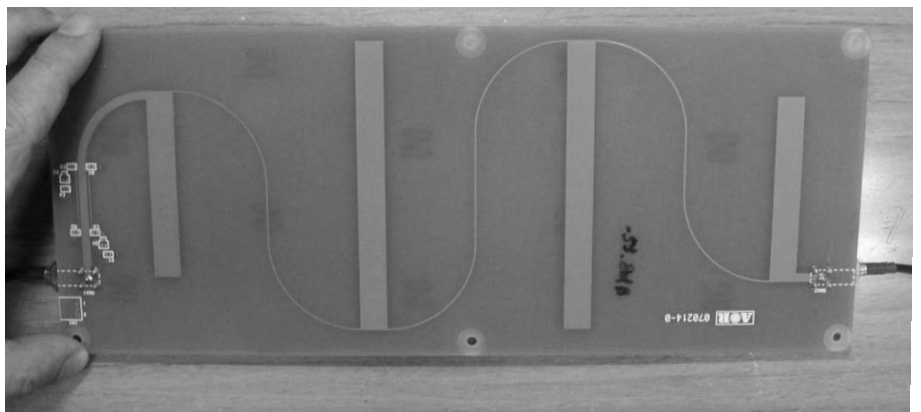



**写真3　筆者が初めて製作したマイクロストリップ線路によるフィルタ**

ンスからずれると，終端で信号の反射が発生し，効率の良いエネルギー伝播ができなくなります．

### ● なぜ同軸ケーブルは50 Ωなのか不思議に思うはず

特性インピーダンスといえば，すぐに思い出すのは**写真4**のような同軸ケーブルです．テスタで両端を測っても短絡なのに，なぜ50 Ωなのかと初めは不思議に思うものです．**図7**のように，50 Ωの信号源をつなぎ，50 Ωで終端したとき，信号源から送り出されたパワーが，反射もなくすべて50 Ωで消費されるとき，その伝送線路の特性インピーダンスが50 Ωであるといいます．

一般的にマイクロ波の回路設計の際に，特性インピーダンスは50 Ωが使われます．そして測定器や，さまざまな部品は50 Ωを基本として設計するように考えられているのが一般的です．そのほかに，ビデオ回路では75 Ω，オーディオでは600 Ωが使われますが，それらがマイクロ波で使われることはまずありません．

### ● マイクロストリップ線路における比誘電率を算出する

同軸ケーブルと同じような分布定数の伝送路をプリント基板上で実現する方法には，大きく分けて**図8**のようなストリップ線路と，マイクロストリップ線路があります．特にマイクロストリップ線路は，マイクロ波の設計の上で主役を演じます．

マイクロ波がプリント基板上の伝送路を伝播する場合，基板材質の誘電率がその伝播速度に直接影響を与えます．マクスウェルの電磁方程式から容易に得られる，電磁波の波動方程式の中で，得られる電磁波の伝播速度$C$は次の式になります．

$$C=\frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}}$$

ただし，μ：透磁率，ε：誘電率とする．

誘電率が大きくなれば，電磁波の伝播速度がその平方根のオーダで遅くなります．すなわち，プリント基板上を伝わるマイクロ波の速さは，自由空間における速度よりも遅くなります．しかし，導体で囲まれたストリップ線路や同軸ケーブルと違って，片方が自由空間のマイクロストリップ線路上の信号は，TEM（Transverse Electromagnetic）モードでは伝播しません．従って，信号の伝播速度は，基板の誘電率だけではなく，パターンの厚み形状などの物理的条件によって違ってきます．ここでは，基板上にどのようなパターンを作ったら，目的の特性インピーダンス線路を得られるかが重要です．そのためには基板の比誘電率ではない，信号に直接寄与する実効比誘電率を計算する必要があります．それは，**図9**に示す式で計算できます．

式は，基板の誘電率と基板の厚さ，パターンの幅，パターンの厚さよって実効比誘電率が計算できることを示しています．とにかく，この複雑な式の計算をすれば，実効比誘電率$\varepsilon_{re}$を計算できます．$\varepsilon_{re}$が分かれば，基板上のある周波数における1波長λ［m］を以下の式で計算できます．

$$\lambda=\frac{3\times10^8}{f\sqrt{\varepsilon_{re}}}$$

また，この実効比誘電率を使い，マイクロストリップ線

**図6　平衡2線伝送路の分布定数**
分布定数の伝送路には特性インピーダンスがある．

**写真4 同軸ケーブル**

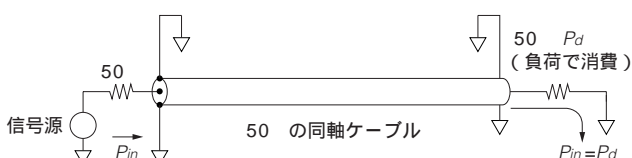



**図7　同軸ケーブルを利用した伝送路のインピーダンス・マッチング**

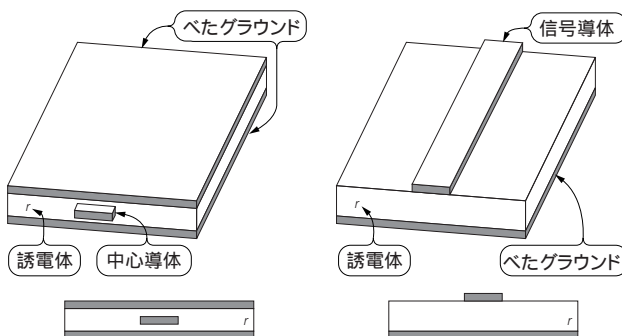



**図8　ストリップ線路とマイクロストリップ線路**

路の特性インピーダンスを**図10**に示す式で計算できます．これも複雑な式をしていますが，注意深く計算すれば，関数電卓で計算できない範囲ではありません．

とにかく手間を惜しまなければ，これで，マイクロストリップ線路の実効比誘電率を計算でき，それを使って，ある周波数における1波長の長さ，およびパターンの特性インピーダンスを計算することが可能となりました．

### ●「AppCAD」を使うと複雑な計算が不要になる

これらの計算をするには，あまりにも複雑すぎて，検算を何度もしないと答えが正しいかどうか確信が持てません．しかし，世の中には強い味方があります．米国Avago Technologies社から，無償のソフトウェアとして有名な，AppCADが公開（http://www.hp.woodshot.com/）されています．これを使えば，上の複雑な計算を影で実行してくれて，確かな答えを容易に得ることが可能です．

例えば一般的に使われる1.6mm厚のガラス・エポキシ基板（FR-4）において，50 Ωの特性インピーダンスを示すパターン幅を計算してみます．ソフトウェアを起動し，Passive回路を選び，マイクロストリップ線路を選ぶと，**図11**のような画面が現れます．

まずは，**図11**の①のところの長さの単位をmmに設定します．次に②のところで基板の材質の比誘電率を入力します．FR-4は代表値が入力されており，自動的に4.6が設定されます．なお，メーカによって若干，その値が変わることがあります．それよりも重要なことは，比誘電率は周波数によって変化することです．カタログ値は割合，低い周波数において測定してあるため，実際はそれより小さくなります．4.6ぐらいを使っていれば，問題はないと思います．

次にパターンの厚みを入力します．一般的に18μmまたは35μmがよく使われます．ここでは③のところに0.018mmと入力します．誘電体の厚みは，④のところに1.6mmと入力します．⑤のところにパターンの幅を2.9mmと入力し，計算ボタンをクリックすると，特性インピーダンスや1波長の長さなどが，たちどころに計算されて表示されます．

もう気が付かれたと思いますが，残念ながら特性インピーダンスが50 Ωになるようなパターン幅を，自動的に計算してくれるわけではありません．しかし，同じ種類の基板は1回計算すれば値が変わることはないので，面倒ですが初めだけ何度か適当に値を入れて計算を繰り返すしかありません．1.6mm厚のFR-4のパターン幅は3mm程度，0.8mm厚のパターン幅は1.5mm程度と覚えておけば，とても便利です．多層基板の場合は，どの層にグラウンドを

$$Z_c = \frac{\eta}{2\pi\sqrt{\varepsilon_{re}}} ln\left[\frac{F}{u} + \sqrt{1+\left(\frac{2}{u}\right)^2}\right]$$

$$F = 6 + (2\pi - 6)\exp\left[-\left(\frac{30.666}{u}\right)^{0.7528}\right]$$

$$\eta = 120\pi$$

**図10　マイクロストリップ線路の特性インピーダンスの計算式**

**図9　実効比誘電率を求める計算式**

基板の誘電率と基板の厚さ，パターンの幅，パターンの厚さよって実効比誘電率が計算できることを示す．

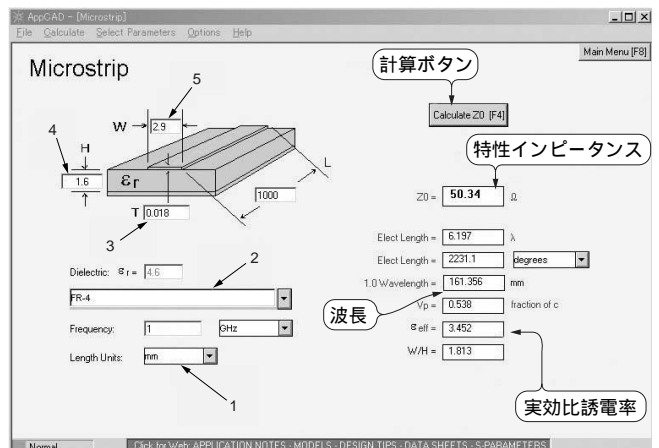



**図11　AppCADを利用し50 Ωの特性インピーダンスを示すパターン幅を計算する際の画面**

①は単位，②は基板材料の比誘電率，③はパターンの厚さ，④は誘電体の厚さ，⑤はパターン幅．

置くかで全く様子が変わってきます．

## 3 マイクロストリップ線路によるインダクタとキャパシタの実現方法

マイクロストリップ線路でフィルタを作るためには，パターンでインダクタとキャパシタを実現する必要があります．マイクロストリップ線路で変えられることといえば，パターンの長さと線幅しかありません．それで，フィルタの要素となるキャパシタとインダクタが実現できます．

方法は大きく分けて2種類あります．まずは**図12(a)**，**(b)**のように，マイクロストリップ線路の50 Ωの伝送路に，異なる特性インピーダンスの線路を接続することにより実現します．線路の長さが波長の1/8程度以下の場合はうまく働きます．

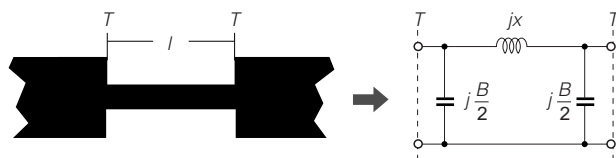
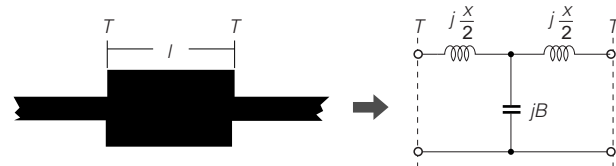
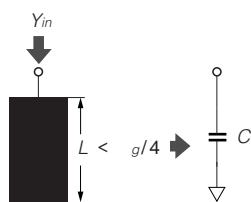
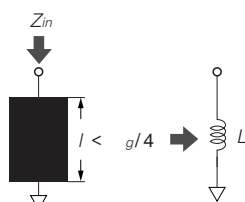
もう一つの方法は，**図12(c)**，**(d)**のような，いわゆるスタブを使う方法です．伝送路の端を短絡させる場合と，開放にする場合があります．

(a) 特性インピーダンスの異なる線路1

(b) 特性インピーダンスの異なる線路2

(c) スタブによるコンデンサ　(b) スタブによるインダクタ

**図12[1] マイクロストリップ線路で作るインダクタとキャパシタ**

(a)，(b)のように，マイクロストリップ線路の50 Ωの伝送路に，異なる特性インピーダンスの線路を接続する方法と，(c)，(d)のような，いわゆるスタブを使う方法がある．

### ■ 異なるインピーダンスの線路の接続による方法

#### ● インダクタの設計

まずはインダクタを考えてみます．50 Ωの伝送路の途中を，**図12(a)**の①のように細くしてみます．すると，それだけで**図12(a)**の②のような等価回路として動作します．すなわち，$x$というリアクタンスとして働かせることが可能です．パターンを細くするということは，50 Ωのインピーダンスに対して，伝送路のインピーダンスが高くなるということです．

具体例を示します．0.8mm厚のFR-4基板(比誘電率4.6)に線幅0.2mmのマイクロストリップ線路を引いたとします．いったいどれくらいのインピーダンスになるでしょうか．先ほど1.5mm幅が約50 Ωといいましたから，それより高いことは明らかです．そこで，AppCADを使って計算すると，**図13**のように約115 Ωになります．

それでは，**図12(a)**の①のような区間の等価回路の各値はどれくらいになるかを以下の式に示します．なお$Z_c$はリアクタンスを実現する伝送路のインピーダンスです．$\lambda_g$はそのリアクタンスを実現している伝送路での実効1波長です．これらは，AppCADを使えば簡単に計算することが可能です．$l$はリアクタンスを実現する伝送路の長さです．

リアクタンス成分 $$x = Z_c \sin\frac{2\pi l}{\lambda_g} \quad \cdots\cdots (1)$$

サセプタンス成分 $$\frac{B}{2} = \frac{1}{Z_c}\tan\frac{\pi l}{\lambda_g} \quad \cdots\cdots (2)$$

ここで伝送路の長さ$l$が$\lambda_g/8$より小さいとき，上の式は次のように近似できます．

$$x \simeq Z_c \frac{2\pi l}{\lambda_g} \quad \cdots\cdots (3)$$

$$\frac{B}{2} \simeq \frac{1}{Z_c}\frac{\pi l}{\lambda_g} \quad \cdots\cdots (4)$$

角周波数をω，伝送路における信号の伝播速度を$V_p$とすると，$\lambda_g = 2\pi V_p/\omega$と表せます．また，インダクタンスを$L$とし，$x = \omega L$とすると，(3)式は，

$$\omega L = Z_c \frac{l\omega}{V_p} \quad \cdots\cdots (5)$$

となります．従って，以下の式が得られます

$$L = \frac{Z_c l}{V_p} \quad \cdots\cdots (6)$$

$Z_c$，$l$，$V_p$は周波数の関数ではなく，定数とみなすことが

でき(厳密にはそうではないが)，インダクタの性質を示していることがよく分かると思います．また，50Ωに対して，$Z_c$が十分大きい場合は，サセプタンス成分は無視できるようになります．ただし，$l$が$\lambda_g/8$を越える周波数になると，近似誤差が大きくなり，アドミタンス成分は周波数に比例しなくなり，純粋なインダクタの性質から離れていくことも分かると思います．

インダクタンスは$Z_c$に比例しますから，できるだけインピーダンスの高い伝送線路の方が，より短い線路で大きなインダクタを実現できます．これは逆にいえば，同じインダクタを実現するために，より大きな伝送路インピーダンスを使う方が，近似を広い範囲で使えますから，より高い周波数まで目的のフィルタとして働かせることが可能だということです．配線パターンのエッチング精度や損失などで，細くするにも限度はあります．しかし，基本的な性質として覚えておかなければならないことです．

### ● キャパシタの設計

次にキャパシタを考えます．インダクタとは逆に，50Ωの伝送ラインの間に，それより低いインピーダンスの伝送線路をつなぎます．そうすると，今度は等価回路は**図12(b)**の②のようになり，グラウンドとの間に$B$というサセプタンスを実現できます．

低いインピーダンスの線路は，50Ωラインよりも太いパターンで実現できます．先ほどと同じように，具体例で考えてみます．0.8mm厚のFR-4(比誘電率4.6)に4.5mmのマイクロストリップ線路を引いたとします．これもAppCADを使って計算すると，約23Ωになります(**図14**)．

**図12(b)**の②のような区間の等価回路の各値がどうなるかを以下に示します．$Z_c$はサセプタンスを実現する線路の特性インピーダンス，$\lambda_g$はその伝送路での実効1波長です．また$l$はサセプタンスを実現する伝送路の長さです．

サセプタンス成分 $$B=\frac{1}{Z_c}\sin\frac{2\pi l}{\lambda_g} \quad \cdots\cdots (7)$$

リアクタンス成分 $$\frac{x}{2}=Z_c\tan\frac{\pi l}{\lambda_g} \quad \cdots\cdots (8)$$

ここで同じく，伝送路の長さ$l$が$\lambda_g/8$より小さい時，上の式は以下のように近似が可能です．

$$B\simeq\frac{1}{Z_c}\frac{2\pi l}{\lambda_g} \quad \cdots\cdots (9)$$

$$\frac{x}{2}\simeq Z_c\frac{\pi l}{\lambda_g} \quad \cdots\cdots (10)$$

角周波数をω，伝送路における信号の伝播速度を$V_p$とすると，$\lambda_g=2\pi V_p/\omega$と表せます．また，キャパシタンスを$C$とし，$B=\omega C$とすると，(9)式は，

$$\omega C=\frac{1}{Z_c}\frac{l\omega}{V_p} \quad \cdots\cdots (11)$$

となります．従って，以下の式が得られます．

$$C=\frac{1}{Z_c V_p} \quad \cdots\cdots (12)$$

インダクタと同じように，$Z_c$，$l$，$V_p$は周波数の関数ではなく定数とみなせ，キャパシタの性質を示していることがよく分かると思います．また，50Ωに対して，$Z_c$が十分小さい場合は，リアクタンス成分は無視できるようになります．ただし，$l$が$\lambda_g/8$を越える周波数になると近似誤差が大きくなります．サセプタンス成分は周波数に比例しなく

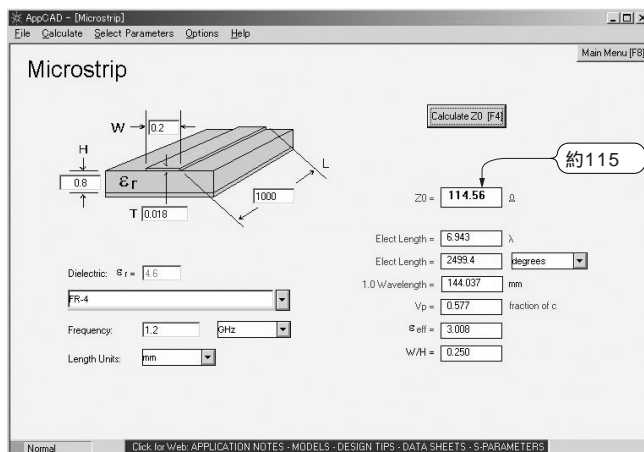



**図13　AppCADを利用し0.8mm厚のFR-4基板に線幅0.2mmのマイクロストリップ線路を引いたときのインピーダンスを計算する際の画面**

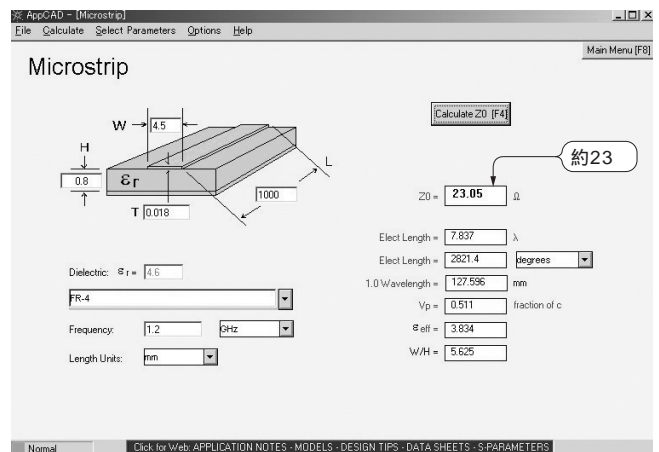



**図14　AppCADを利用し0.8mm厚のFR-4基板に線幅4.5mmのマイクロストリップ線路を引いたときのインピーダンスを計算する際の画面**

なり，純粋なキャパシタの性質から離れていくことも分かると思います．

キャパシタンスは$Z_c$に逆比例しますから，できるだけインピーダンスの低い伝送線路の方が，より短い線路で大きなキャパシタを実現できます．これはまた，逆にいえば，同じキャパシタを実現するために，より小さな伝送路インピーダンスを使う方が，近似を広い範囲で使えますから，より高い周波数まで目的のフィルタとして働かせることができるということです．

いずれにしても，異なるインピーダンスのマイクロストリップ線路をつなぐ方法による，$LC$素子の実現では，基本的に細いパターンはインダクタに，太いパターンは等価的にキャパシタの性質になると覚えておけば，パターンを見るときにとても便利です．

## ■ スタブを使う方法

**図12(c)**，**(d)**に示すように，伝送路の端を開放または短絡した伝送線路をスタブと呼んでいます．高周波に慣れしたしんだ方は，すぐにスミス・チャートを回転する振る舞いが頭に浮かんでくると思います．λ/4以下のオープン・スタブ(開放端)は，**図12(c)**の②のように，キャパシタとして働きます．また，λ/4以下のショート・スタブ(短絡端)は，**図12(d)**の②のように，インダクタとして働きます．

### ● λ/4以下のオープン・スタブはキャパシタを構成する

まずは，オープン・スタブのアドミタンスを考えます．マイクロストリップ線路上の波長を$\lambda_g$，スタブの長さを$l$，伝送路の特性インピーダンスを$Z_c$としたとき，

$$Y = \frac{1}{Z_c}\tan\frac{2\pi l}{\lambda_g} \quad \cdots\cdots (13)$$

となります．伝送路の信号伝播速度を$V_p$，信号の角周波数をωとしたとき，$\lambda_g = 2\pi V_p/\omega$と表せます．そこで，前章と同じように，$l < \lambda_g/8$の場合，近似的に(13)式は，

$$Y \simeq \frac{1}{Z_c}\frac{2\pi l}{\lambda_g} = \omega\left(\frac{lV_p}{Z_c}\right) \quad \cdots\cdots (14)$$

と表せます．この(14)式より，オープン・スタブは$C = l \cdot V_p/Z_c$のキャパシタとして働くことが分かります．また伝送路の特性インピーダンス$Z_c$ができるだけ小さい方が(伝送線路の幅が広い方が)，短いスタブで大きなキャパシタを実現できます．短い方が，近似に使った$l < \lambda_g/8$の条件を満たす周波数範囲が広くなり，フィルタの部品として使った場合，都合がよくなります．

### ● λ/4以下のショート・スタブはインダクタを構成する

今度は，ショート・スタブのインピーダンスを考えます．同じくマイクロストリップ線路上の波長を$\lambda_g$，スタブの長さを$l$，伝送路のインピーダンスを$Z_c$としたとき，

$$Z = Z_c \tan\frac{2\pi l}{\lambda_g} \quad \cdots\cdots (15)$$

です．$l < \lambda_g/8$の場合，(15)式の近似式として，

$$Z \simeq Z_c\frac{2\pi l}{\lambda_g} = \omega\left(\frac{lZ_c}{V_p}\right) \quad \cdots\cdots (16)$$

となります．(16)式より，ショート・スタブの場合は$L = l \cdot Z_c/V_p$のインダクタとして働くことが分かります．また式より$Z_c$が大きい方が(伝送線路の幅が狭い方が)短いスタブで大きなインダクタを実現できます．

オープン・スタブもショート・スタブも$l = \lambda_g/4$で共振し，$l$がそれを越えると特性が激変し，インダクタがキャパシタに，キャパシタがインダクタの性質に変わります．スミス・チャートで180°以上回転した場合に当たります．いずれにしても得たい特性の周波数範囲が$\lambda_g/8$の範囲に入っていた方が，計算値に近い特性が得られます．

＊　＊　＊

フィルタの基本であるインダクタとキャパシタは，マイクロストリップ線路だけで実現できることが分かりました．近号では，それらを使ってローパス・フィルタを設計してみます．


**参考・引用*文献**

(1) *Jia-Sheng Hong and M. J. Lancaster；Microstrip Filters for RF/Microwave Appications，2001，John Wiley & Sons.
(2) David M. Pozar；Microwave Engineering，2005，John Wiley & Sons.
(3) 森 栄二；マイクロウエーブ技術入門講座，2003年，CQ出版社.
(4) 西村芳一；ディジタル信号処理による通信システム設計，2006年，CQ出版社.
(5) John Ardizzoni；A Practical Guide to High-Speed Printed-Circuit-Board Layout，Analog Dialogue, Vol.39，Nov.3，2005.



**にしむら・よしかず**
**(株)エーオーアール**
**ja6uhl@cqsstv.com**